doi:10.13866/j.azr.2019.01.23

内蒙古温暖与寒冷指数在气温突变前后异常变化特征[①]

代海燕, 朝鲁门, 杨丽萍, 郭瑞清, 陈素华, 都瓦拉
(内蒙古生态与农业气象中心,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要: 通过分析内蒙古地区1961—2016年温暖指数(warmth index)和寒冷指数(coldness index),得出该区域平均和突变前后指数的时空分布。结果表明:突变前WI和CI倾向率局地镶嵌分布,整体以上升趋势为主;突变后WI倾向率以上升为主,CI以下降为主。在气候变暖大背景下,气温突变后内蒙古东部区CI呈整体降低趋势,表明气候在变暖同时东部区冷季也在变冷,地区气候两极化趋势明显,存在明显的"冷暖急转"的现象。5 a滑动平均结果表明,暖季热量增加相对稳定,而冷季热量增减波动较大,进入21世纪CI呈下降趋势,比WI提前10 a进入下降阶段。内蒙古东部区CI指数倾向率在气温突变后呈明显的区域下降趋势,而在中西部区呈上升和下降的镶嵌格局。

关键词: 气候变化; 温暖指数; 寒冷指数; 时空变化; 内蒙古

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)第5次评估报告指出,1880—2012年全球陆地和海洋表面平均温度升高了(0.85 ± 0.20)℃[1-2]。近百年中国增温趋势大于全球平均趋势[3],内蒙古东部地区作为我国北方高纬度地区,增温高于全国平均水平[4-5]。内蒙古属典型中温带季风气候,自东向西气候呈带状分布,由湿润、半湿润区逐步过渡到半干旱、干旱区。在此背景下,温度带向北推移[6-9],不同温度带间的界线变化涉及到热量资源的重新分配,可能对植物分布格局产生深远影响[10-13]。特别是对处于某些生态过渡带的区域植物而言,气候变化的影响将更为直观[14-15]。在此背景下,研究内蒙古地区温暖指数(WI)和寒冷指数(CI)的空间年代变化显得尤为重要,因为气候是决定植被类型和分布的最主要因素。一般来说,温度决定树种的南北界限,水分决定着树种的东西界限。如果其中一个条件发生变化,树种的可能分布范围和最适分布范围也会相应移动。Kira等[16-21]在研究日本气候与森林分布的关系时,首先将最早记载于欧洲地理学中的温暖指数(WI)引入植物生态学中;Yim[22]利用这些指标研究了朝鲜半岛树种分布与气候的关系。Kira等的温暖指数和寒冷指数自20世纪80年代中期由徐文铎等[23-26]引入我国植被与气候关系的定量研究中,其后Fang等[27-29]、林思祖等[30]、张军涛等[31]、谢晓金等[32]、牛建明[33]、许娟等[34]、李峰等[35]分别应用Kira指数研究了我国福建、南京、内蒙古、青藏高原和大兴安岭等地带性树种的气候—植被指标及植被的区划。在当前全球气候变暖背景下,本文利用内蒙古116个气象站1961—2016年的温度数据,分析了内蒙古地区WI和CI的时空变化以及气温突变前后的变化特征,旨在为研究植被恢复提供气候变化相关的科学依据。

1 研究区概况

内蒙古东起126°04′E,西至97°12′E,东西直线距离2 400 km以上;南起37°24′N,北至53°23′N,直线距离1 700 km;东、南、西依次与黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、宁夏和甘肃8省区毗邻,跨越三北(东北、华北、西北),靠近京津;北部与蒙古国和俄罗斯联邦接壤,国境线长4 200 km。全区地势

① 收稿日期: 2018-06-13; 修订日期: 2018-07-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(41461102);林业公益性行业专项(201304206);内蒙古自治区自然科学基金项目(2016MS0376);内蒙古自然科学基金项目(2017MS0377);内蒙古自然科学基金项目(2010MS0606)资助
作者简介: 代海燕(1978-),男,博士,主要从事林业气象与生态气象方面的研究. E-mail: daihaiyan2003@163.com
通讯作者: 杨丽萍. E-mail:549976901@qq.com

较高,平均海拔高度 1 000 m 左右,基本上是一个高原型的地貌区。在山地向高平原、平原的交接地带,分布着黄土丘陵和石质丘陵,其间杂有低山、谷地和盆地分布,水土流失较严重。总的气候特点是春季气温骤升,多大风天气;夏季短促而炎热,降水集中;秋季气温骤降,霜冻往往早来;冬季漫长严寒,多寒潮天气 。内蒙古东中西部地区主要以常规行政区划分为主,内蒙东部区为呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市;中部区为锡林郭勒盟、乌兰察布市、呼和浩特市和包头市;西部区为巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、乌海市和阿拉善盟。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文使用资料主要为内蒙古 106 个气象站点近 56 a 来月平均气温数据。该资料来源于内蒙古自治区气象局订正后气象资料数据库,采用的是单位质量控制以后的数据,订正入库后数据,因气温数据缺测较少,数据质量相对稳定。少部分日平均缺测,用最高和最低求和除以 2,如果最高最低缺测,用前后 2 d 平均值,如果 1 个台站部分阶段缺测,就用附近台站做线性回归补齐,因气温是大区域范畴,尤其本文采用的月平均数据,整体数据质量较高。东中西部突变前后的 WI 和 CI 平均值也是区域台站从 1961—1988 年和 1989—2016 年的年平均值。

2.2 Kira 各指数

温暖指数(warmth index)的计算公式为[18,23,24]:

$$WI=\sum_{i=1}^{n}(t_i-5)$$

式中:t_i为平均气温为 5 ℃以上的第 i 个月的平均温度;n 为月平均气温大于 5 ℃的月数;WI 的单位是℃·月。

寒冷指数(coldness index)为:$CI=-\sum_{i=1}^{n}(5-t_i)$

即月平均气温低于 5 ℃的总和。

2.3 M-K 突变分析

M-K 方法是由世界气象组织推荐的应用于时间序列分析的方法,已经广泛应用于检验水文、气温等气象资料分析。关于该方法的介绍参见文献〔36〕。本文运用 M-K 方法分析内蒙古年平均气温的突变情况。

2.4 气候统计方法

气候分析采用回归统计方法计算内蒙古地区近 30 a 序列的气候倾向率,即以年代 t 为时间因子,气候要素 x 为模拟对象,建立线性回归方程:$x(t)=c+bt$。其中 c、b 为待定系数,b 为气候要素趋势,若 $b>0$ 表示气候要素呈上升趋势,$b<0$ 表示气候要素呈下降趋势,$b\times10$ 称为气候倾向率,单位为:气象单位·$(10a)^{-1}$。采用相关系数法进行气候要素变化趋势的显著性检验。

3 结果与分析

3.1 平均气温趋势和突变分析

1961—2016 年内蒙古地区气温呈逐渐上升趋势,特别是 1988 年以后整个地区暖化趋势明显,大部年份气温都处于平均值以上,其气候倾向率为 0.365 ℃·$(10a)^{-1}$,线性回归相关系数 $r=0.753>r_{0.01}$,呈极显著增加趋势(图 1a)。M-K 突变检验结果可以看出,内蒙古年平均气温 UF 曲线和 UB 曲线在 1988 年相交,因此判断年平均气温突变年份为 1988 年(图 1b)。

3.2 WI 和 CI 气温突变前后空间变化

WI倾向率在气温突变前大部地区呈上升趋势,

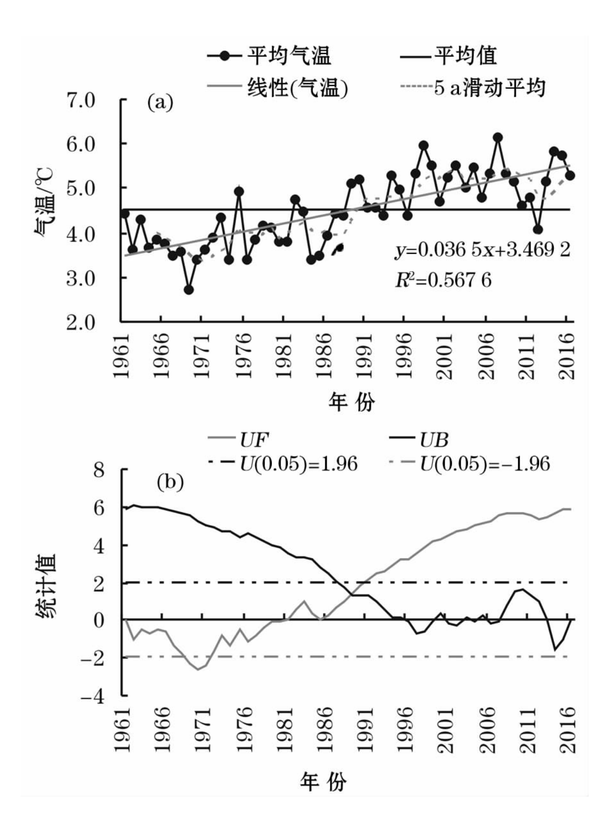
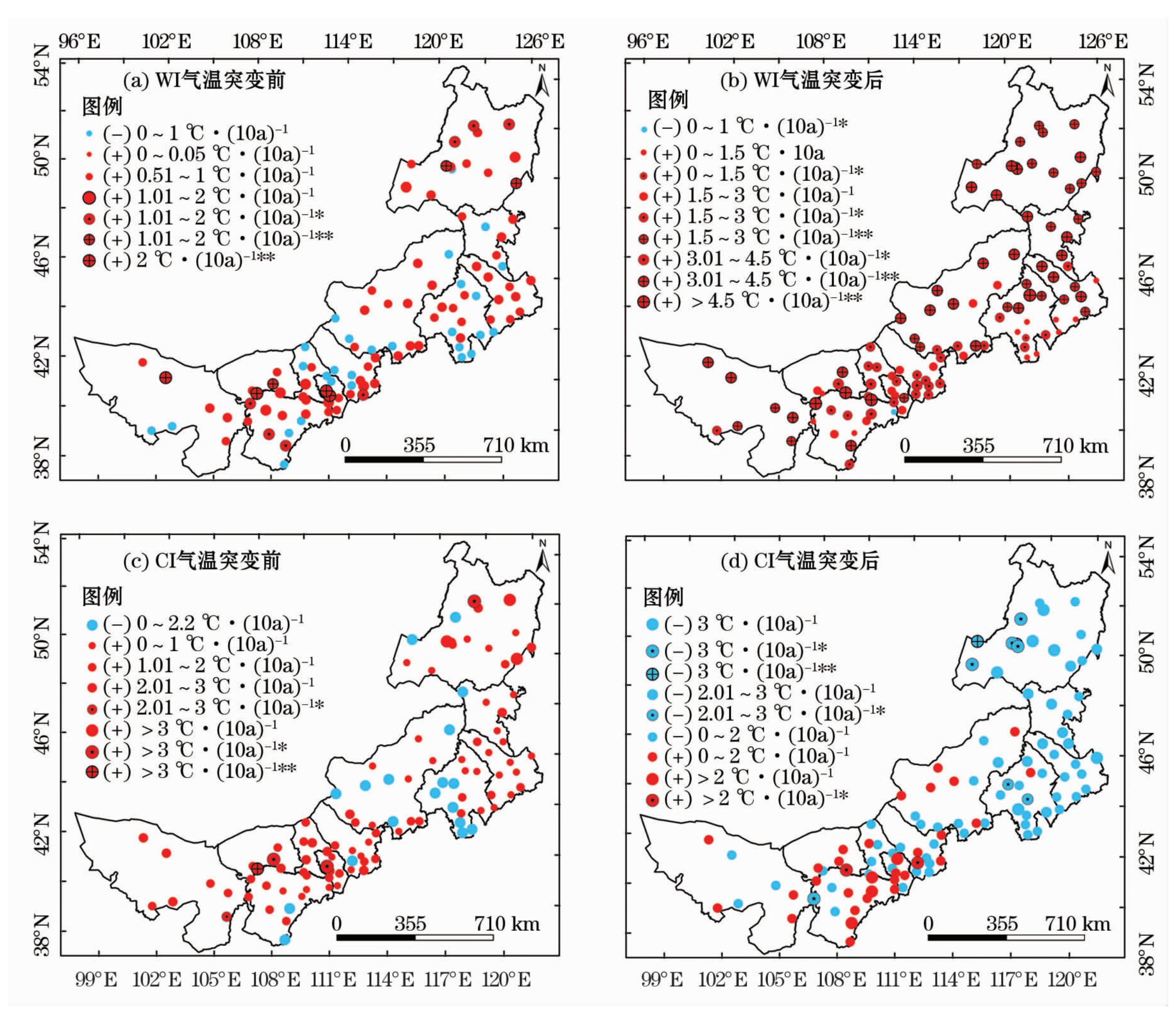


图 1 1961—2016 年内蒙古年平均气温变化趋势及突变分析

Fig. 1 Temperature change trend and its mutation analysis in Inner Mongolia from 1961 to 2016



注：* 表示 $P<0.05$ 显著，* * 表示 $P<0.01$ 显著。

图 2 1961—2016 年内蒙古 WI 和 CI 倾向率变化及气温突变前后变化趋势和空间分布

Fig. 2 Tendency rate change of warmth index and coldness index and the change trend and spatial distribution before and after temperature mutation in Inner Mongolia from 1961 to 2016

其中显著性上升区主要集中在大兴安岭西北、呼和浩特市和河套部分地区，WI 倾向率下降区与上升区镶嵌分布，且集中在大青山北麓和赤峰市南部（图 2a），同时倾向率降低幅度明显小于上升程度，下降区倾向率不足 1 ℃ · 月 · (10a)$^{-1}$，而气温突变后 WI 倾向率大部地区呈明显的上升趋势，显著性上升的站点达 78%，其中极显著性上升站点为 50%，同时大部地区倾向率上升达 1.5 ℃ · 月 · (10a)$^{-1}$以上（图 2b）。整体来看，突变前 WI 倾向率局地镶嵌分布，突变后主要以上升为主，WI 上升原因主要以气温突变后的贡献为主。CI 倾向率在气温突变前多数站点呈上升趋势，其中东部区及中西部地区上升较为明显，尤其是阴山地区和呼伦贝尔市东北部上升尤为明显，倾向率下降区域主要集中在赤峰市东部和锡林郭勒盟地区（图 2c）；而气温突变后 CI 倾向率多数站点呈下降趋势，尤其是内蒙古东北部呼伦贝尔草原、大兴安岭林区、内蒙古东南部大兴安岭南段岭东的西辽河平原、科尔沁沙地等地区下降尤为明显和集中，其中显著性下降区域主要集中在大兴安岭西麓。气温突变后内蒙古阴山山脉中段 CI 增加比较明显，且多以镶嵌分布为主（图 2d）。近 56 a WI 和 CI 的倾向率变化趋势都呈上升趋势，其很好地掩盖了气温突变前后不同变化过程，表明倾向率分析与起始年限有很大关系，如不具体分析很容易掩盖中间的变化过程。整体来看，内蒙古地区气候变暖是个共识问题，但在气温突变后内蒙古地区多数站点 CI 呈降低趋势，表明气候在变暖的同时部分地区冷季也在变冷（即 CI 呈增加趋势），尤其是内蒙古东部区气候两极化趋势明显，其是否受北极涛动、西伯利亚高压等大气环流背景的

影响[37-38],同时这种变化趋势与下垫面、经纬度、海拔之间的关系还有待于进一步研究。

IPCC 第 5 次报告中指出[39-40],20 世纪全球年平均地表温度上升了约 0.6 ℃,尤其是 1970 年以来增暖速率显著加快[39],最近几年,有学者指出 2000 年以来全球变暖开始减弱甚至已经停止变暖,变暖速率显著减缓[39,41]。在此背景下,Cohen 等[42]还发现北半球热带外,大陆冬季的地表温度存在着由增暖转变为近 10 a 中性甚至变冷的系统性减弱现象,而春、夏、秋季增暖趋势不变。从内蒙古 WI 和 CI 突变前后的变化来看,虽然地区突变年份与变暖加速期和减缓期的时间有差异,但在 20 世纪 90 年代以后至 2016 年这个相对减缓期内内蒙古东部区和东北部地区在寒冷指数上与中西部地区存在明显差异,这与 Cohen 等[42]和王迪等[43]的冬季降温和欧亚大陆中高纬度地区增温速率减缓的研究一致。内蒙古东部区 CI 指数的这种现象表明:在气温突变后冬季增温更多是因为季节划分和平均气温分析导致,其实冷季的寒冷程度并没有减轻,加之春季和秋季气温的显著回升,地区冷暖急转现象尤为明显。

3.3 东中西部 WI 和 CI 突变前后变化趋势

在气候变暖大背景下,内蒙古东中西部 WI 和 CI 在气温突变前都呈增加趋势,气温突变后 WI 增加趋势更加明显,而气温突变后东部区 CI 呈减少趋势(低温日数呈增加的趋势),这与冯青荣等[44]得出东北北部严寒期延长趋势明显的结论相一致,表明内蒙古东部区在气温突变后存在明显的"冷暖急转"的现象,气候向两极化发展的趋势,春季温度迅速回升,秋季缩短,夏季高温天数增加,冬季低温天数也呈增加的趋势,这种现象在内蒙古东部区较为明显,中西部地区却不存在(图 3a)。而气温突变前后 WI 增加百分比从大到小的顺序为:中部、东部和西部,表明中东部 WI 的增加比西部区明显,CI 增加百分比从大到小的顺序为:西部、中部、东部,最冷的东北地区反而是 CI 增加最少的地区(图 3b)。上述研究结果与王迪等[43]提出的北半球降温幅度比南半球的大,冬季降温强度要比夏季大等一致,进一步表明北半球中高纬度地区冬季变暖减缓特征更加明显,当然按季节分析也存在一定局限性,因各地冬季具体时间长短差异较大,所以用温度区间分析,结果会更加直观。

3.4 WI 和 CI 平均趋势及突变前后分析

近 56 a 内蒙古地区 WI 和 CI 在气温突变前都呈上升趋势,其倾向率变化分别为 0.511 ℃·月·$(10a)^{-1}$和 1.134 ℃·月·$(10a)^{-1}$,两者线性回归都未达到显著性水平(图 4a);而气温突变后 WI 呈显著上升趋势,其气候倾向率为 2.546 ℃·月·$(10a)^{-1}$,线性回归相关系数 $r=0.596>r_{0.01}$,CI 呈现弱的减少趋势,其气候倾向率为 0.872 ℃·月·$(10a)^{-1}$(图 4b),表明在气候变暖的同时,冷季并没有出现明显回暖趋势;从图 4c 可以得出,近 56 a WI 和 CI 都呈显著上升趋势,其中 WI 的 5 a 滑动更接近于直线,相对 WI 而言 CI 的 5 a 滑动平均趋势波动较大,说明两者在上升过程中 CI 的波动性更大(图 4c);年代变化分析表明,WI 在 1961—2010 年都呈上升趋势,而在 21 世纪 10 年代呈现微弱下降趋势,CI 在 20 世纪 60—90 年代呈上升趋势,从 21 世纪开始呈现微弱的下降趋势,CI 比 WI 提前 10 a 进入下降趋势(图 4d),气候突变后全区大部呈明显增温趋势,而 WI 只在近 6 a 处于平均值偏低的

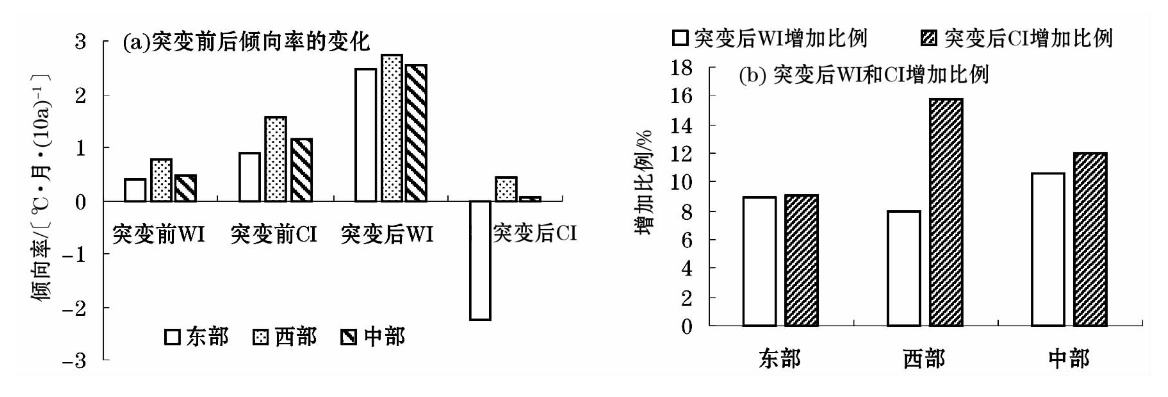


图 3 1961—2016 年内蒙古东中西部 WI 和 CI 趋势变化及气温突变前后增加的比例

Fig. 3 Trend change of warmth index and coldness index before and after temperature mutation in Inner Mongolia from 1961 to 2016

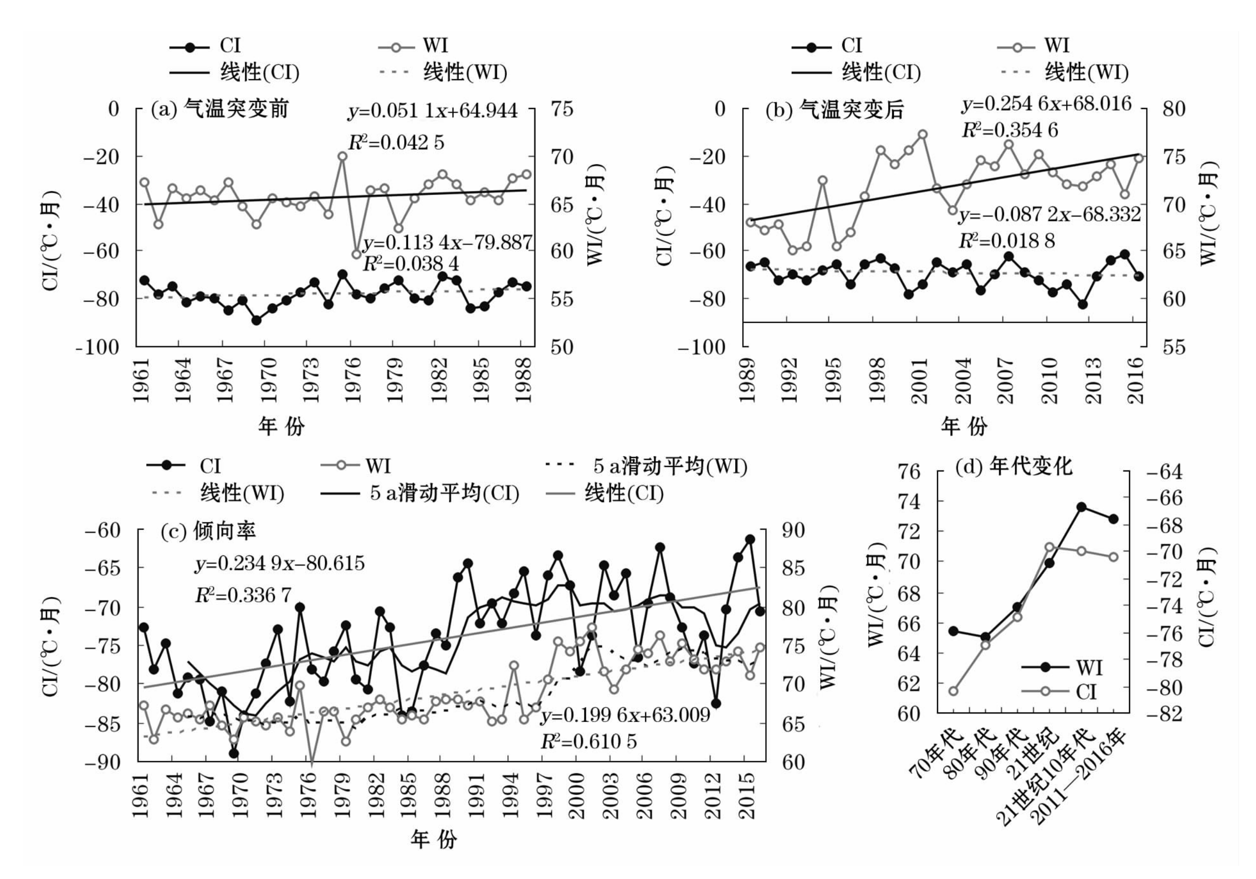


图 4　1961—2016 年内蒙古 WI 和 CI 趋势变化及气温突变前后变化趋势

Fig. 4　Trend change of warmth index and coldness index and the change trend before and after temperature mutation in Inner Mongolia from 1961 to 2016

状态，考虑到气温周期变化，6 a 也不是一个完整的年代周期，这种现象是阶段还是持续有待于进一步观察。而 CI 年代平均值在 21 世纪后呈现微弱的下降趋势，其主要贡献是内蒙古东部区 CI 在气温突变后呈现区域整体减少趋势，从而导致全区的平均值偏低。其中的大气环流背景、气温的周期变化对内蒙古东中西部的差异也有待于进一步分析。内蒙古东部区 CI 突变后的变化特征与沈永平等[45]、Easterling 等[46]、Li 等[47]、王绍武等[48]研究的 2000 年以来全球变暖开始减弱甚至已经停止变暖，或者说增暖速率在下降的结论一致，在内蒙古东部区和东北部地区冬季的 CI 指数变化也证明了 Cohen 等[42]、Kosaka 等[49]、Trenberth 等[50]、王迪等[43]分季节对北半球热带以外大陆的温度趋势进行分析，发现冬季温度在近十几年呈变冷趋势，明显降温区出现在欧亚大陆、美国以及澳大利亚，而北半球降温幅度比南半球大，冬季降温区的强度要比夏季大等研究结论。在内蒙古中高纬度存在的 CI 减少现象，在内蒙古中西部地区表现并不明显，这种变化的原因还有待于进一步研究。

4　结论与讨论

4.1　结论

（1）1961—2016 年内蒙古地区年平均气温呈显著上升趋势，其气候倾向率为 0.365 ℃·$(10a)^{-1}$，年平均气温突变年份为 1988 年。

（2）整体来看 WI 和 CI 突变前以上升为主，同时局地以上升和下降镶嵌分布为主。突变后 WI 倾向率以上升为主，CI 以下降趋势为主，在气候变暖大背景下，内蒙古东部区气候冷暖两极化趋势明显。

（3）分区研究结果也表明，气温突变后内蒙古东部区 WI 明显增加，CI 进一步降低，气温回升和降低过渡期明显缩短，存在明显的“冷暖急转”的现象，而中西部地区不存在这种现象。

（4）近 56 a 内蒙古地区 WI 和 CI 在气温突变前主要以上升趋势为主，但未达到显著性水平；气温突变后 WI 呈显著上升趋势，而 CI 在气温突变后呈微弱的下降趋势。5 a 滑动平均结果表明，两者上升趋势中 CI 的波动性更大；年代变化分析表明，WI 仅在近 6 a 呈下降趋势，而 CI 从 2000 年后呈微弱下降

趋势,CI 比 WI 提前 10 a 进入下降趋势。

4.2 讨论

关于内蒙古气温变化的研究基本都是以变暖为主,同时南北纬度带对气温的影响明显要大于东西经度的影响程度。在地区气候变暖大背景下,气温突变后内蒙古地区 CI 呈降低的趋势,表明气候在变暖的同时部分地区冷季也在变冷,气候两极化趋势明显,内蒙古东部区表现尤为明显。近 56 a WI 和 CI 的倾向率变化均呈上升趋势,这一变化很好地掩盖了突变前后不同的变化特征,表明倾向率分析与起始年限关系密切,如不具体分析很容易掩盖中间的变化过程。从 WI 和 CI 的 5 a 滑动平均整体趋势看, CI 波动性明显要大于 WI,表明暖季热量增加比较稳定,而冷季热量增加波动较大,进入 21 世纪 CI 呈下降趋势,比 WI 提前 10 a 进入下降阶段,这种变化对地区农业和树种分布的影响还有待于进一步研究。目前区域气候变化的研究多以气候变暖为主,且以量化的时空分布、季节、年际变化为主,提出了未来气温各种模型的预测。气候变暖已是共识,但各地变暖的过程和年际分布各有差异,如大兴安岭地区暖季越暖,冷季亦越冷,气候在变暖的同时也向冷暖两极化发展[51],而这种变化在地区的表现是否相同,同时这种变化趋势与下垫面、经纬度、海拔的关系还有待于进一步研究。本研究中内蒙古东部区 CI 指数倾向率在气温突变后呈明显的区域下降趋势,而在中西部区呈上升和下降的镶嵌格局,这种区域变化特征是由气候环流大背景的差异造成的,还是由气象自动观测仪器更新以及部分站点迁移等人为因素引起,这将有待于进一步探讨。

参考文献(References):

〔1〕 IPCC. Climate Change 2013:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change〔M〕. Cambridge & New York:Cambridge University Press,2013.

〔2〕 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展〔J〕. 地理科学进展,2014,33(7):874－883.〔Qin Dahe. Climate change science and sustainable development〔J〕. Progress in Geography,2014,33(7):874－883.〕

〔3〕 气候变化国家评估报告编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告〔M〕. 北京:科学出版社,2014.〔Writing Committee of National Assessment Report on Climate Change. Third National Assessment Report on Climate Change〔M〕. Beijing:Science Press,2014.〕

〔4〕 Lu N,Wilske B,Ni J,et al. Climate change in Inner Mongolia from 1955 to 2005 trends at regional,biome and local scales〔J〕. Environmental Research Letters,2009,4(4):45 006.

〔5〕 李喜仓,郭瑞清,杨丽桃,等. 近 50 年内蒙古东部水热变化及对农业的影响〔J〕. 地理科学,2009,29(5):755－759.〔Li Xicang,Guo Ruiqing,Yang Litao,et al. Changes of precipitation and temperature and its impacts on agriculture in recent 50 years in Eastern Inner Mongolia〔J〕. Scientia Geographica Sinica 2009,29(5):755－759.〕

〔6〕 缪启龙,丁园圆,王勇. 气候变暖对中国亚热带北界位置的影响〔J〕. 地理研究,2009,28(3):634－642.〔Miao Qilong,Ding Yuanyuan,Wang Yong. Impact of climate warming on the northern boundary of subtropical zone of China〔J〕. Geographical Research,2009,28(3):634－642.〕

〔7〕 Fang Jingyun,Song Yongchang,Liu Hongyan,et al. Vegetation climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China〔J〕. Acta Botanica Sinica,2002,44(9):1 105－1 122.

〔8〕 郑景云,卞娟娟,葛全胜,等. 中国 1951—1980 及 1981—2010 年的气候区划〔J〕. 地理研究,2013,32(6):987－997.〔Zheng Jingyun,Bian Juanjuan,Ge Quansheng,et al. The climate regionalization in China for 1951－1980 and 1981－2010〔J〕. Geographical Research,2013,32(6):987－997.〕

〔9〕 沙万英,邵雪梅,黄玫. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响〔J〕. 中国科学(D 辑:地球科学),2002,32(4):317－326.〔Sha Wanying,Shao Xuemei,Huang Mei. Climate warming in China and its impact on natural regional boundaries since 1980s〔J〕. Scientia Sinica Terrae,2002,32(4):317－326.〕

〔10〕 Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change:Annual Review of Ecology〔J〕. Evolution & Systematics,2006,37(1):275－290.

〔11〕 Walther G,Post E,Convey P,et al. Ecological responses to recent climate change〔J〕. Nature,2002,416(6 879):389－395.

〔12〕 Menzel A,Sparks T,Estrella N,et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern〔J〕. Global Change Biology,2006,12(10):1 969－1 976.

〔13〕 Thuiller W,Lavorel S,Araújo M B,et al. Climate change threats to plant diversity in Europe〔J〕. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2005,102(23):8 245－8 250.

〔14〕 戴君虎,王梦麦,王焕炯,等. 近 50 年中国西北东部半湿润、半干旱过渡带气候变化及生态影响〔J〕. 第四纪研究,2009,29(5):920－930.〔Dai Junhu,Wang Mengmai,Wang Huanjiong,et al. Climate changes and their ecological impacts of the last 50 years in semihumid and semiaird transitional zones of the east part of north west China〔J〕. Quaternary Sciences,2009,29(5):920－930.〕

〔15〕 李晓东,傅华,李凤霞,等. 气候变化对西北地区生态环境影响的若干进展〔J〕. 草业科学,2011,28(2):286－295.〔Li Xiaodong,Fu Hua,Li Fengxia,et al. Research progress on effects of

climate change on ecological environment in North-west China[J]. Pratacultural Science,2011,28(2):286－295.]

[16] Kira T. A New Classification of Climate in Eastern Asia as the Basis for Agricultural Geography. Horicultural Institute[M]. Kyoto: Kyoto University,1945:1－23.

[17] Kira T. Terrestrial Ecosystem an Introduction[M]. Tokyo:Kyoritsu Shuppan,1976.

[18] Kira T. A climatological interpretation of Japanese vegetation zones [C]//Miyawaki A,Txen R. Vegetation Science and Environmental Protection. Tokyo:Maruzen,1977:21－30.

[19] Kira T. Forest ecosystems of East and Southeast Asia in global perspective[J]. Ecology Research,1991,6:185－200.

[20] Numata M. The relationship between vegetation zones and climatic ones[J]. International Journal of Biometeorology,1984,21(1):1－10.

[21] Hattori T,Nakaxishi S. On the distributional of the lucidophyllous forest in the Japanese Archipelago[J]. The Botanical Magazine, 1985,98:317－333.

[22] Yim Y J. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula. Ⅲ. Distribution of tree species along the thermal gradient[J]. Japanese Journal of Ecology,1977,27(3):177－189.

[23] 徐文铎. 东北主要树种的分布与热量关系的初步研究[J]. 东北林学院学报,1982(4):1－10.[Xu Wenduo. Northeast of main tree species of the preliminary research on the relationship between distribution and heat[J]. Journal of Northeast Institute,1982(4): 1－10.]

[24] 徐文铎. 东北地带性植被建群种及常见种的分布与水热条件关系的初步研究[J]. 植物学报,1983,25(3):264－273.[Xu Wenduo. The relation between distribution of edificatory and compation in zonal vegetation and water temperature condition in Northeast China[J]. Acta Botanica Sinica,1983,25(3):264－273.]

[25] 徐文铎. 中国东北主要植被类型的分布与气候的关系[J]. 植物生态学报,1986,10(4):254－263.[Xu Wenduo. The relation between the zonal distribution of types of vegetation and the climate in Northeast China[J]. Acta Phytoecologica Sinica,1986,10(4): 254－263.]

[26] 徐文铎,常禹. 中国东北地带性顶极植被类型及其预测判别模型——动态地植物学说的继承与发展(I)[J]. 应用生态学报,1992,3(3):215－222.[Xu Wenduo,Chang Yu. Zonal climax vegetation types in Northeast China and their predicted discriminant model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,1992,3(3): 215－222.]

[27] Fang J Y,Yoda K. Climate and vegetation in China (Ⅱ):Distribution of main vegetation types and thermal climate[J]. Ecological Research,1989,4:71－83.

[28] Fang J Y,Yoda K. Climate and vegetation in China (Ⅳ). Distribution of tree species along the thermal gradieat[J]. Ecological Research,1990,5:291－302.

[29] Fang J Y,Yoda K. Climate and vegetation in China (Ⅴ). Effect of climatic factors on the upper limit of distribution of evergreen broadleaf forest[J]. Ecological Research,1991,6:113－125.

[30] 林思祖,刘玉宝,罗雪妹,等. 杉木及其混交树种的垂直分布与热量关系[J]. 福建林学院学报,2000,20(3):211－214.[Lin Sizu,Liu Yubao,Luo Xuemei,et al. The correlation between vertical distribution and vertical thermal indexes of Chinese fir and its mixed species in Fujian [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2000,20(3):211－214.]

[31] 张军涛,李哲,郑度. 东北农牧交错区水分条件及其对植被分布的影响[J]. 地理科学,2001,21(4):297－300.[Zhang Juntao,Li Zhe,Zheng Du. The moisture regime of transitional areas of farming and pasturing in the Northeastern China and its effects on vegetation distribution[J]. Scientia Geographical Sinica,2001,21(4):297－300.]

[32] 谢晓金,郝日明. Kira 与 Holdridge 热力指标对常绿树种耐低温能力的评价[J]. 福建林学院学报,2006,26(3):258－261.[Xie Xiaojin,Hao Riming. Application of Kira and Holdridge's temperature indexes to low temperature tolerance of evergreen trees[J]. Journal of Fujian College of Forestry,2006,26(3):258－261.]

[33] 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究[J]. 应用生态学报,2000,11(1):47－52.[Niu Jianming. Relationship between main vegetation types and climatic factors in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2000,11(1):47－52.]

[34] 许娟,张百平,谭靖,等. 青藏高原植被垂直带与气候因子的空间关系[J]. 山地学报,2009,27(6):663－670.[Xu Juan, Zhang Baiping,Tan Jing,et al. Spatial relationship between altitudinal vegetation belts and climatic factors in the Qinghai Tibetan plateau[J]. Journal of Mountain Science,2009,27(6):663－670.]

[35] 李峰,周广胜,曹铭昌. 兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟[J]. 应用生态学报,2006,17(12):2 255－2 260.[Li Feng,Zhou Guangsheng,Cao Mingcang. Responses of *Larix gmelinii* geographical distribution to future climate change:A simulation study [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006,17(12): 2 255－2 260.]

[36] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术山[M]. 北京:气象出版社,1999.[Wei Fengying. Diagnostic and Forecasting Techniques in Modern Climate Statistics[M]. Beijing:China Meteorological Press,1999.]

[37] 陈建宇,赵景波. 1960—2014 年内蒙古极端天气事件趋势分析[J]. 干旱区研究,2017,34(5):997－1 009.[Chen Jianyu,Zhao Jingbo. Trends of extreme weather events in Inner Mongolia during the period of 1960－2014 [J]. Arid Zone Research,2017,34(5): 997－1 009.]

[38] 罗继,代君梅,杨虎,等. 1971—2014 年新疆区域寒潮气候特征[J]. 干旱区研究,2017,34(2):309－315.[Luo Ji,Dai Junmei, Yang Hu,et al. Climatic characteristics of cold wave in Xinjiang during the period of 1971－2014 [J]. Arid Zone Research,2017, 34(2):309－315.]

[39] IPCC. Climate Change 2013:The Physical Science. Contribution of

Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York:Cambridge University Press,2013.

[40] 任福民,翟盘茂. 1951—1990 年中国极端气温变[J]. 大气科学,1998,22(2):217 - 227.[Ren Fumin,Zhai Panmao. Analysis of the extreme temperature in China during 1951 - 1990[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1998,22(2):217 - 227.]

[41] 赵军,师银芳,王大为,等. 1961—2008 年中国大陆极端气温时空变化分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(3):52 - 56.[Zhao Jun ,Shi Yinfang,Wang Dawei,et al. Temporal and spatial changes of extreme temperatures in China during 1961 - 2008[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(3):52 - 56.]

[42] Cohen J,Barlow M,Saito K. Decadal fluctuations in planetarywave forcing modulate global warming in late boreal winter[J]. Journal of Climate,2009,22:4 418 - 4 426.

[43] 王迪,何金海,祁莉,等. 全球变暖减缓背景下欧亚秋冬温度变化特征和原因[J]. 气象科学,2015,35(5):534 - 542[Wang Di,He Jinhai,Qi Li,et al. Temperature characteristic of Eurasia in autumn and winter and its causes under global warming mitigation[J]. Journal of the Meteorological Sciences,2015,35(5):534 - 542.]

[44] 冯青荣,刘普幸. 近 54 a 中国北方严寒期时空变化特征及其影响因素[J]. 干旱区研究,2017,34(2):316 - 323.[Feng Qingrong,Liu Puxing. Spatiotemporal change of cold periods and their affecting factors in North China in recent 54 years [J]. Arid Zone Research,2017,34(2):316 - 323.]

[45] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1 068 - 1 076.[Shen Yongping,Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1 068 - 1 076.]

[46] Easterling D R,Wehner M F. Is the climate warming or cooling [J]. Geophysical Research Letters,2009,36. doi:10. 1029/2009GL037810.

[47] Li Q X,Yang S,Xu W H,et al. China experiences the recent warming hiatus[J]. Geophysical Research Letters,2015,42:889 - 898.

[48] 王绍武,叶瑾琳. 近百年全球气候变暖分析[J]. 大气科学,1995,19(5):545 - 553.[Wang Shaowu,Ye Jinlin. An analysis of global warming during the last one hundred years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1995,19(5):545 - 553.]

[49] Kosaka Y,Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. Nature,2013,501:403 - 407.

[50] Trenberth K E,Fasullo J T,Branstator G,et al. Seasonal aspects of the recent pause in surface warming [J]. Nature Climate Change,2014,4:911 - 916.

[51] 代海燕,陈素华,武艳娟,等. 内蒙古大兴安岭生态功能区冷暖季节气候变化趋势分析[J]. 冰川冻土,2016,38(3):645 - 652.[Dai Haiyan,Chen Suhua,Wu Yanjuan,et al. Analysis of the warm and cool sermon's clime variations in the ecological function sites in the Grey Khingan,Inner Mongolia [J]. Journal of Glxiology and Geocryology,2016,38(3):645 - 652.]

Abnormal Change of Warmth Index and Coldness Index before and after Temperature Mutation in Inner Mongolia

DAI Hai-yan, CHAO Lu-men, YANG Li-ping, GUO RUI-qing, CHEN Su-hua, DU Wa-la

(*Inner Mongolia Centre of Ecology and Agrometeorology*,*Hohhot* 010051,*Inner Mongolia*,*China*)

Abstract: In this paper,the warmth index (WI) and coldness index (CI) in Inner Mongolia from 1961 to 2016 were analyzed,and the spatiotemporal distribution of these indexes and their changes before and after the temperature mutation were concluded. The results showed that the tendency rates of WI and CI were distributed in an inlaid pattern before the temperature mutation;after the temperature mutation,the tendency rate of WI was mainly in an increase trend,but that of CI was mainly in a decrease trend. In the context of climate warming,the CI in Inner Mongolia was holistically decreased after the temperature mutation,which revealed that it also became colder in cold season in east Inner Mongolia under the climate warming,and there were the sharp changes of both warmth and coldness. The five-year a moving average results showed that the heat increase in warm season was relatively stable,but the heat increase or decrease in cold season fluctuated obviously. The CI was in a decrease trend since the 21st century,and such decrease occurred 10 years earlier than that of WI. The tendency of CI in east Inner Mongolia was significantly decreased after the temperature mutation,and the tendency rates of WI and CI were distributed in an inlaid pattern in the central and western parts of Inner Mongolia.

Key words: climate change;warmth index; coldness index; spatiotemporal variation; Inner Mongolia